بررسی تأثیر فیلم در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای مقیاس کوچک سوپرآلیاژ Hastelloy X*

(یادداشت پژوهشی)

مهدی آتش‌پروا[۱]		محسن حامدی[۲]

چکیده *در این مقاله ابتدا یک رابطهٔ جدید برای محاسبهٔ مقاومت الکتریکی ناشی از فشردگی جریان و حضور فیلم‌های سطحی برروی ورق‌ها در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای مقیاس کوچک ارائه شده‌است. سپس شبیه‌سازی بااستفاده از مدل جدید انجام شده و اعتبار آن مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. برای تصدیق نتایج حاصل از شبیه‌سازی پس از ساخت Set-up آزمایش‌های عملی برروی ورق‌هایی از جنس Hastelloy X انجام پذیرفت و مشخص گردید که قطر دکمهٔ جوش حاصل از آزمایش‌ها دارای سازگاری خوبی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی می‌باشد. بیشترین میانگین قطر جوش درصورت وجود لایهٔ نازک فیلم به‌وجود می‌آید. همچنین وجود فیلم استحکام کششی را بهبود می‌دهد. ارتفاع دکمهٔ جوش درصورت وجود فیلم ضخیم بیشینه می‌باشد که به‌دلیل رخداد بیرون‌زدگی است.*

واژه‌های کلیدی جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای مقیاس کوچک، مقاومت فیلم، مقاومت تماسی، Hastelloy X.

Investigating the Effect of Film in SSRSW of Hastelloy X Superalloy

M. Atashparva		M. Hamedi

Abstract *At this paper, a new equation has been presented to calculate the electrical resistance caused by constriction and presence of surface films on the sheets in small scale resistance spot welding. Then, the simulations have been conducted using the new model and its validity has been evaluated. Experimental verification was carried out on sheets made of Hastelloy X and it was found that the experimental nugget diameters have a good agreement with the results of the simulation. The maximum nugget diameter was created in the case of thin film. Also, existence of film layer improves tensile strength. At the presence of thick film the height of the weld is maximum that can be due to expulsion.*

Key Words Small Scale Resistance Spot Welding; Film resistance; Contact resistance; Hastelloy X.

*تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۱۲/۲۸ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۱/۱۵ می‌باشد. DOI: 10.22067/fum-mech.v30i1.63369

(۱) نویسندهٔ مسئول: دکترای تخصصی، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران. m_atashparva@ut.ac.ir

(۲) استاد، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران.

مقدمه

جوشکاری مقاومتی یکی از قدیمی‌ترین فرایندهای الکتریکی است که در صنایع استفاده می‌شود. جوش، توسط ترکیب حرارت، فشار و زمان ایجاد می‌گردد. قطعه‌کارها توسط دو الکترود فشرده می‌شوند تا با اعمال نیرو، فیلم یا اکسیدهای روی سطوح تماس شکسته شود و یک اتصال مناسب تولید گردد. علاوه‌بر کاربردهای جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای در مقیاس بزرگ، علاقه به جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای مقیاس کوچک نیز به‌دلیل نیاز به کوچک‌سازی در صنایع شدت گرفته‌است. کاربرد این نوع از جوشکاری در وسایل الکترونیکی خودرو، اجزای ارتباط از راه دور و محصولات پزشکی می‌باشد. در این فرایند، حرارت لازم به‌خاطر مقاومت الکتریکی دربرابر عبور جریان ایجاد می‌شود. مطابق با قانون ژول این حرارت (q) از رابطهٔ (۱) به‌دست می‌آید [1]:

$$q = R_t I^2 t \qquad (۱)$$

که I شدت جریان، R_t مقاومت الکتریکی کل و t زمان عبور جریان است. مقاومت از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$R_t = R_b + R_c \qquad (۲)$$

که در آن R_b مقاومت جسمی مواد و R_c مقاومت تماسی می‌باشند. مقاومت جسمی از رابطهٔ معروف $\rho l/A$ قابل‌محاسبه است؛ ولی مقاومت تماسی نیاز به بحث و بررسی بیشتری دارد. ازآنجاکه سطوح کاملاً صاف نیست و دارای زبری‌های بسیار کوچک می‌باشد، تماس مستقیم واقعی بین سطوح فقط در تعداد محدودی از نقاط اتفاق می‌افتد. همچنین همهٔ فلزات دارای اکسیدهایی با هدایت حرارتی پایین هستند و سطوح کاملاً تمیز در واقعیت وجود ندارند. عبور جریان از چنین سطحی توسط هدایت از طریق فیلم‌ها و نقاط تماس مستقیم فلز با فلز انجام می‌شود و درنتیجه یک مقاومت درمقابل عبور جریان وجود خواهد داشت، بنابراین می‌توان گفت مقاومت تماسی خود از دو جزء تشکیل شده‌است: مقاومت انقباضی (R_s) ناشی از فشردگی جریان در زیر نواحی تماسی و مقاومتی که به‌واسطهٔ فیلم‌های سطحی با رسانایی کمتر ایجاد می‌شود (R_f).

$$R_c = R_s + R_f \qquad (۳)$$

درزمینهٔ مقاومت انقباضی مدل‌های گوناگونی ارائه شده‌است که توضیحات و مقایسهٔ آنها توسط حامدی و آتش پروا [2] انجام پذیرفته‌است، اما درمورد مقاومت فیلم تحقیقات چندانی انجام نشده‌است. در میان حدود پانزده مدلی که تاکنون برای محاسبهٔ مقاومت تماسی ارائه شده‌اند، فقط سه مدل وجود دارند که علاوه‌بر مقاومت انقباضی، مقاومت فیلم را نیز مدل‌سازی نموده‌اند که به بیان آنها می‌پردازیم.

برای لایه‌های نازک گازها یا روغن با ضخامت تقریبی یک مولکول (حدود ۳۰ آنگستروم یا کمتر)، مقاومت فیلم می‌تواند توسط رابطهٔ زیر محاسبه شود [3]:

$$R_f = \gamma / A_a \qquad (٤)$$

که A_a سطح تماس و γ مقاومت فیلم به‌ازای واحد سطح است که بستگی به ضخامت فیلم و انرژی خروج الکترون مادهٔ موردنظر دارد. برای فیلم‌های ضخیم که توسط تغییرشکل پلاستیک تحت بار واردشده تخریب می‌شوند، مقاومت فیلم بستگی به کل زیر نواحی به‌جای کل ناحیهٔ تماسی خواهد داشت [3].

در تئوری کلاسیک هنگامی‌که یک فیلم عایق روی سطح فلزی وجود دارد، الکترون‌ها قادر نیستند از فیلم

عبور کنند، اما مطابق با فیزیک کوانتوم هنگامی‌که ضخامت فیلم با مسیر آزاد متوسط الکترون فلزات در دمای اتاق قابل‌مقایسه باشد؛ یعنی در محدودهٔ Å ۵۰۰۰–۵۰، الکترون‌ها ممکن است بتوانند توسط اثر تونلی از فیلم عبور کنند [4]. در این موارد مقاومت فیلم می‌تواند به‌صورت زیر نوشته شود [3, 4]:

$$R_f = \rho_t \xi H / F \qquad (۵)$$

که ρ_t مقاومت فیلم به‌ازای سطح واحد است و مقاومت ویژهٔ تونلی نامیده می‌شود [4]. همچنین H سختی، F نیروی فشاری و ξ ضریب فشار هستند که مقدار ضریب فشار اغلب ۰/۷ درنظر گرفته می‌شود.

همچنین مقاومت فیلم در سطح تداخل می‌تواند توسط رابطهٔ (٦) بیان گردد که در آن ρ_f مقاومت ویژهٔ لایهٔ فیلم، a شعاع مؤثر نقطهٔ تماس، H_V سختی ورق، n تعداد نقاط تماسی و F بار می‌باشد [5].

$$R_f = \rho_f S / \pi a^2 \quad , \quad a = \sqrt{F / \pi n H_V} \qquad (٦)$$

در مطالعهٔ نا و پارک [6] مقاومت تماسی به‌عنوان یک المان یک‌بعدی توسط این فرض که فیلم آلودگی در ناحیهٔ تماسی به تعداد قطعه‌هایی با فواصل مساوی خواهد شکست، مدل‌سازی گردید. آنها تأثیر نیروی تماسی روی شکل‌گیری دکمهٔ جوش را مورد بررسی قرار دادند. اندازه‌گیری مقاومت تماسی در ورق آلیاژ آلومینیم توسط کرینن و اِوانس [7] انجام شد. در این کار تأثیر زبری سطح و ضخامت فیلم بررسی گردید. نتایج در قالب تئوری مقاومت انقباضی هالم برای نقاط تماس فلزبه‌فلز که با حضور فیلم‌های اکسید پوشیده شده بودند، تفسیر گردید. در یک مطالعهٔ دیگر تأثیرات مقاومت تماسی موضعی روی متغیرهای فرایند، نرخ خنک‌شدن، توزیع محلول جامد و شکل دکمهٔ جوش بعد از انجماد توسط وِی و وو بررسی شد [8]. این کار تأثیر مقاومت‌های فیلم و انقباضی را روی جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای در مراحل گرم‌شدن، ذوب‌شدن، خنک‌شدن و فشردگی بررسی کرده‌است.

لی و همکاران [9] عنوان کردند که مقادیر مقاومت استاتیک اندازه‌گیری‌شده اکثراً تأثیر فیلم را نشان می‌دهد که ممکن است اندازهٔ آن بزرگ‌تر از مقاومت انقباضی باشد و به شرایط سطحی، فشار و دما حساس باشد. جریان جوشکاری در چند سیکل اول فیلم‌های سطحی را می‌شکند و مقاومت فیلم درمقایسه با مقاومت انقباضی ناچیز می‌شود.

وان و همکاران [10] مطالعه‌ای با هدف توسعهٔ یک سیستم کنترل کیفیت مؤثر در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای مقیاس کوچک براساس مقاومت دینامیک انجام دادند و متوجه شدند که تغییرات مقاومت دینامیک با فرایند شکل‌گیری دکمهٔ جوش مرتبط است.

تحلیل تئوری

چنان‌چه تعداد نقاط تماسی زیاد باشد، می‌توان مقاومت انقباضی را بااستفاده از رابطهٔ زیر به‌دست آورد [3]:

$$R_s = \rho / 2\tau \qquad (۷)$$

که ρ مقاومت ویژهٔ الکتریکی است و شعاع هالم (τ) می‌تواند بااستفاده از سطحی که بار را تحمل می‌کند (A_b) به‌دست آید:

$$\tau = \sqrt{A_b / \pi} \qquad (۸)$$

این فرض صحیح است، زیرا هنگامی‌که بار تا حد نهایی خود افزایش می‌یابد، تعداد نقاط تماسی زیاد خواهند شد تا این که سرانجام به یکدیگر پیوسته می‌شوند و یک ناحیهٔ واحد را تشکیل می‌دهند. همچنین در این حالت در برجستگی‌های تماسی تسلیم رخ خواهد داد. ناحیهٔ تحمل‌کنندهٔ بار توسط رابطهٔ زیر

به‌مقدار بار اعمالی و تنش تسلیم ماده (σ_y) مرتبط خواهد شد:

$$A_b = F/\sigma_y \quad (۹)$$

با ترکیب رابطه‌های (۹-۷) می‌توان مقاومت انقباضی را به‌صورت زیر بیان نمود:

$$R_s = \rho\sqrt{\pi\sigma_y/4F} \quad (۱۰)$$

بدیهی است که F مقدار حداکثر بار است؛ زیرا مقاومت انقباضی زمانی به‌وجود می‌آید که جریان از قطعه‌ها عبور کند، که در این زمان مقدار نیروی اعمالی از سوی الکترودها به حداکثر مقدار خود رسیده‌است. البته در این رابطه تنش تسلیم می‌تواند به‌صورت تابعی از دما بیان گردد.

برای یک سطح واقعی یک ترم مقاومت دیگر نیز لازم است که ناشی از حضور فیلم سطحی می‌باشد (رابطهٔ ۳). برای سادگی فرض می‌شود تأثیر فشار روی مقاومت فیلم همانند تأثیر آن بر مقاومت انقباضی است. پس می‌توان فرض کرد:

$$R_f = \frac{\rho_f}{2}\sqrt{\frac{\pi\sigma_y}{F}} \quad (۱۱)$$

در عمل تنش تسلیم با افزایش دما کاهش می‌یابد و مقاومت فیلم نیز چنین رفتاری دارد. بنابراین در این مدل رابطهٔ بین مقاومت فیلم و دما به‌صورت کیفی صحیح است. در مدل مقاومت تماسی در شبیه‌سازی با هدف کاربردهای عملی مطلوب است که تعداد پارامترهای ورودی را درصورتی‌که بتوان دقت را در حد معقولی حفظ نمود حتی‌الامکان کم کرد. این یکی از دلایلی است که در هر دو جزء مقاومت تماسی تأثیر فشار نرمال به‌صورت یکسان درنظر گرفته شده‌است، اگرچه این عمل نیاز به اعتبارسنجی تجربی دارد.

شبیه‌سازی کامپیوتری

در شبیه‌سازی کار حاضر فرض شده‌است که الکترودها خصوصیات حرکتی کامل دارند به‌نحوی‌که یک نیروی الکترود گستردهٔ ثابت و یکنواخت می‌تواند به‌عنوان شرایط مرزی مکانیکی استفاده شود. همچنین در تحلیل مکانیکی مواد همسانگرد درنظر گرفته شده‌اند. تغییر فاز از حالت جامد به مایع فقط برای ورق‌ها درنظر گرفته شده‌است که این پدیده درصورتی‌که هر نقطه از ورق به دمای ۱۶۱۸ K، که دمای ذوب Hastelloy X است، برسد در همان محل رخ خواهد داد. مقدار دمای نهان ذوب نیز ۳۱۰ kJ/kg درنظر گرفته شده‌است. نوع جریان الکتریکی اعمال‌شده جریان مستقیم (DC) می‌باشد.

شبیه‌سازی بااستفاده از یک مدل سه‌بعدی در نرم‌افزار COMSOL Multiphysics انجام شده‌است. کلیهٔ معادلات موجود در مدل شبیه‌سازی را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد. گروه اول معادلاتی هستند که به‌عنوان ورودی به شبیه‌سازی داده خواهند شد. برای مثال می‌توان به معادلات به‌دست‌آمده توسط مؤلفان اشاره کرد که برای محاسبهٔ مقاومت تماسی و کلیهٔ ویژگی‌های مواد برای ورق‌ها و الکترودها، به‌صورت معادلات وابسته به دما در شبیه‌سازی لحاظ می‌شوند. تمامی این گروه از معادلات به‌صورت توابع تحلیلی به شبیه‌سازی اعمال می‌شوند، اما گروه دوم معادلات دیفرانسیلی هستند که درحین شبیه‌سازی و مابین ماژول‌های مختلف شبیه‌سازی وجود دارند. برای مثال می‌توان به معادلهٔ میدان الکتریکی برحسب پتانسیل الکتریکی، توزیع میدان حرارت گذرا و کلیهٔ معادلات انتقال حرارت (رسانش و جابه‌جایی) اشاره کرد. این گروه از معادلات در برنامهٔ COMSOL بااستفاده از روش تکرارشوندهٔ نوع نیوتونی حل می‌شوند. گام زمانی درنظر گرفته‌شده در مطالعهٔ حاضر ۲ ms است و نتیجهٔ حل معادلات هر ماژول پس از به‌روزرسانی در

هر گام زمانی به ماژول بعدی انتقال می‌یابد. ماژول‌های اصلی شامل مکانیکی، الکتریکی و انتقال حرارت می‌باشند که هر یک دارای زیربخش‌های گوناگون هستند. در کل باید گفت که مدل مقاومت تماسی جدیدی که در این مطالعه ارائه شده‌است یک مدل تحلیلی است. سپس این مدل تحلیلی توسط شبیه‌سازی عددی اعتبارسنجی می‌شود و درپایان نتایج آن با روش تجربی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

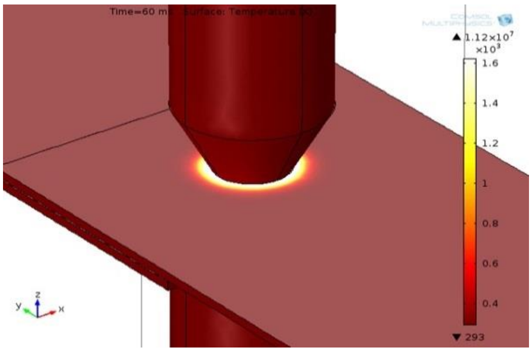
المان‌های انتخاب‌شده برای مش‌بندی مدل ترکیبی از دو نوع چهارضلعی و مثلثی می‌باشند و تعداد آنها ۳۹۲۷۱ عدد از نوع چهارضلعی و ۲۱۰۳۵ عدد از نوع سه‌گوش می‌باشد. همچنین مدل از ۱۱۱۵ عدد المان لبه‌ای یا ضلعی و ٤۸ عدد المان از نوع رأس یا نقطه‌ای برای مش‌بندی استفاده کرده‌است.

ابعاد ورق‌ها ۳۸×۱۵ mm است و دارای ضخامت ۰/٤mm می‌باشند. همچنین از الکترودهای نوک‌مخروطی با قطر قسمت استوانه‌ای ٦ mm، قطر نوک الکترود ۳ mm و طول ۲۸ mm استفاده شده‌است. جنس الکترودها از آلیاژ مس مطابق با استاندارد RWMA Class 2 می‌باشد.

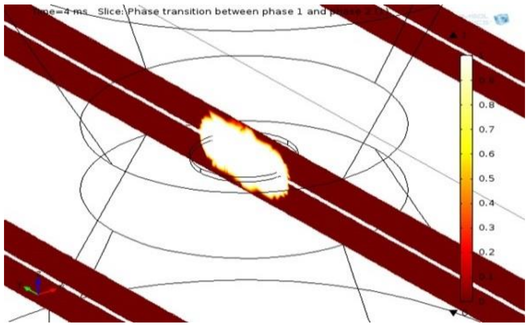
فرایند شبیه‌سازی حاضر تمامی پارامترهای مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و همچنین اثرات متقابل آنها ازجمله انبساط حرارتی، گرمایش الکترومغناطیسی و اثرات ترموالکتریک را درنظر می‌گیرد. همچنین لایهٔ فیلم روی ورق‌ها نیز مدل‌سازی شده‌است. برخلاف LSRSW به‌علت ابعاد کوچک الکترود در SSRSW از آب برای خنک‌کردن الکترودها استفاده نمی‌شود. مقدار نیروی اعمالی به الکترود فوقانی در سه مقدار ۱۵/٤۱، ۲۳/۱۱ و ۳۰/۸۲ نیوتن روبه‌پایین قابل‌تنظیم است و شدت جریان می‌تواند ۲۸۲، ۳۲۷ و یا ۳۷۲ آمپر باشد که این مقادیر بااستفاده از انجام آزمایش‌های عملی به‌دست آمده‌اند. مقاومت تماسی بین دو ورق بااستفاده از رابطهٔ به‌دست‌آمده در بخش تحلیل تئوری اعمال شده‌است (مجموع روابط ۱۰ و ۱۱) که ρ، ρ_f و σ_y هر یک به‌صورت تابعی از دما به مدل داده خواهند شد.

درابتدا سیکل فشردگی توسط تحلیل مکانیکی مدل می‌شود. فشار توزیعی یکنواخت مطابق با نیروی الکترود مشخص‌شده محاسبه می‌شود و برروی الکترود بالایی اعمال می‌گردد، درحالی‌که کف الکترود پایینی از حرکت درجهت عمودی منع شده‌است. خروجی تحلیل این بلوک که شامل تغییرشکل، فشار تماسی، شعاع تماس، مقدار نفوذ و غیره می‌باشد به تحلیل الکتریکی- حرارتی داده می‌شود که در آن جریان جوشکاری اعمال می‌گردد. پتانسیل الکتریکی صفر به کف الکترود پایینی اعمال می‌شود و توزیع چگالی جریان از مقدار جریان ورودی اعمال‌شده به بالای الکترود فوقانی محاسبه می‌شود. همهٔ سطوح آزاد الکترود و ورق که در این بازهٔ زمانی در تماس نیستند، دارای انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد با هوای اطراف می‌باشند. پس از اعمال شرایط مرزی الکتریکی، توزیع حرارت که از تحلیل الکتریکی- حرارتی فوق برای یک گام زمانی مشخص محاسبه شده‌است به‌عنوان شرایط بارگذاری حرارتی برای بخش تحلیل حرارتی- مکانیکی بعدی اعمال می‌شود. تغییرشکل الکترود و ورق‌ها و تغییر وضعیت تماس در پایان هر تحلیل حرارتی- مکانیکی افزایشی به‌عنوان ورودی به مرحلهٔ بعدی تحلیل الکتریکی- حرارتی داده می‌شود. این روش به‌روزرسانی برای یک بازهٔ زمانی مشخص تکرار می‌شود تا این‌که کل سیکل جوشکاری تکمیل شود.

در شکل (۱) توزیع حرارت ناحیهٔ جوش در زمان ٦۰ ms بااستفاده از نیروی ۱۵ N و جریان ۳۷۲ A دیده می‌شود. شکل (۲) نیز مقطع برش‌خوردهٔ بین دو ورق را در وسط الکترودها نشان می‌دهد که نحوهٔ رشد منطقهٔ مذاب در آن مشخص می‌باشد.



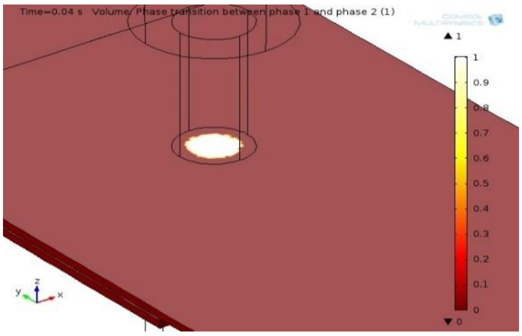
شکل ۱ توزیع حرارت ناحیهٔ جوش
(۱۵ N و ۳۷۲ A ،٦۰ ms)



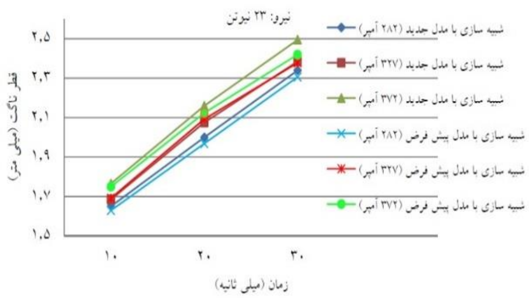
شکل ۲ مقطع برش‌خوردهٔ بین دو ورق در وسط الکترودها (ms ٤، ۳۷۲ A و ۱۵ N)

اعتبارسنجی مـدل. پـس از شـبیه‌سـازی بااسـتفاده از رابطهٔ تماسی جدید، زمـان آن فـرا مـی‌رسـد کـه مـدل توسط یک منبع دیگر اعتبارسنجی شـود. بـه‌ایـن‌خـاطر بااسـتفاده از اطلاعـات موجـود در مرجـع [11] مـدل شبیه‌سازی می‌شود و کارایی مدل جدید مـورد ارزیـابی قرار می‌گیـرد. در مرجـع [11] از ورق‌هـایی بـا جـنس فولاد نرم با ضخامت ۰/۲ mm استفاده شده‌اسـت. نـوع الکترودها RWMA Class 2 پلـه‌ای سـرتخت بـا قطـر ۳/۲ mm و قطـر نـوک الکتـرود ۱/۵۸ mm مـی‌باشـد. مقـدار نیـرو دارای سـه سـطح ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ نیـوتن است و شدت جریان ۱۰۰۰ آمپر است. قطر جـوش در حالت‌های مختلف ارزیابی گردیده‌است. نتـایج حاصـل از مدل جدید سازگاری خـوبی بـا نتـایج مرجـع [11] دارد. همچنین زمان شروع ذوب در مرجـع [11] بـرای نیروهای ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ نیوتن به‌ترتیب ۱۲، ۲۰ و ٤۲ میلی‌ثانیه است که با نتایج حاصل از مدل جدید تطابق دارد. شکل (۳) شبیه‌سازی مدل جدید را بـا نیـروی N ۱۰۰ و در زمـان ٤۰ ms بـه‌عنـوان یـک نمونـه نشـان می‌دهد. قطر جوش درحدود ۱/۱ mm است کـه دقیقـاً با نتایج [11] هم‌خوانی دارد.

در مرحلهٔ بعد کل شبیه‌سازی‌ها بااسـتفاده از مـدل پیش‌فرضِ برنامهٔ COMSOL برای مقاومـت الکتریکـی تماسی، تکرار می‌گـردد. قطـر دکمـهٔ جـوش از منطقـهٔ تماسی بین دو ورق در هر دو حالت (مدل پیش‌فـرض و مدل جدید ارائه‌شـده در ایـن تحقیـق) بـرای تمـامی مقادیر نیرو، جریان و زمان اندازه‌گیری می‌گردد که یک نمونه از نتایج آنها در نمودار شـکل (٤) قابـل‌مشـاهده است.



شکل ۳ شبیه‌سازی مدل جدید، قطر دکمهٔ جوش ۱/۱ mm
(۱۰۰ N و ۱۰۰۰ A ،٤۰ ms)

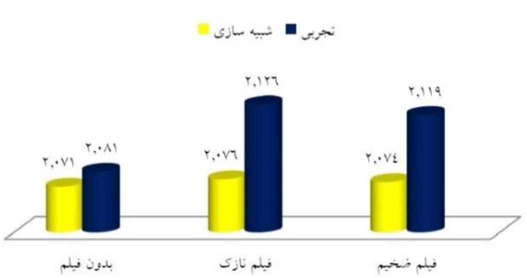


شکل ٤ مقایسهٔ قطر دکمهٔ جوش حاصل از شبیه‌سازی با مدل پیش‌فرض نرم‌افزاز و مدل جدید برای سطوح مختلف نیرو، جریان و زمان جوشکاری

از این نمودارها مشخص است که رونـد تغییـرات هـر دو مـدل تقریبـاً یکسـان اسـت و نتـایج عـددی به‌دست‌آمده برای قطر دکمهٔ جوش بسیار به‌هم نزدیـک

است. نکتهٔ قابل ذکر این است که در اکثر موارد مدل جدید قطر دکمهٔ جوش را کمی بیشتر از مدل پیش‌فرض برنامه پیش‌بینی می‌کند. طبق نتایج شبیه‌سازی قطر دکمهٔ جوش با افزایش جریان و زمان جوشکاری افزایش پیدا می‌کند و با افزایش نیرو مقدار آن کاهش می‌یابد. سایر مقایسه‌ها و تحلیل نتایج پس از انجام آزمایش‌های تجربی ارائه خواهد شد.

بررسی تأثیر فیلم. تأثیر ضخامت لایهٔ فیلم برای سه حالت بدون فیلم، فیلم نازک با ضخامت 1 µm و فیلم ضخیم با ضخامت 10 µm شبیه‌سازی شده‌است. اندازه‌گیری قطر دکمهٔ جوش در سطح بین دو ورق و به‌صورت میانگین قطرهای افقی و عمودی برای هر جوش انجام پذیرفته‌است. نمودارهای بررسی تأثیر ضخامت فیلم بر نتایج شبیه‌سازی قطر دکمهٔ جوش برای سه سطح نیرو، سه سطح جریان و سه سطح زمان مشخص می‌کند که در حالت‌های گوناگون اثر ضخامت فیلم متفاوت است و در برخی از مواقع باعث افزایش قطر دکمهٔ جوش و در برخی دیگر از مواقع باعث کاهش قطر آن شده‌است؛ اما درمجموع نتایج بسیار به یکدیگر نزدیک هستند. به‌همین‌خاطر در شکل (۵) تأثیر ضخامت فیلم بر میانگین قطر دکمهٔ جوش ترسیم شده‌است که نشان‌دهندهٔ این واقعیت است که میانگین قطرهای حاصل از شبیه‌سازی بسیار به یکدیگر نزدیک‌اند. اگرچه بیشترین میانگین قطر دکمهٔ جوش در حضور لایهٔ فیلم نازک به‌دست آمده‌است؛ اما به‌نظر می‌رسد بررسی تأثیر فیلم نیاز به مطالعات تجربی بیشتر دارد.



شکل ۵ تأثیر ضخامت فیلم بر میانگین قطر دکمهٔ جوش حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش‌ها

آزمایش‌های تجربی

دستگاه‌های جوشکاری مقیاس کوچک در کشور ما وجود ندارند و خرید تجهیزات آنها بسیار گران‌قیمت است. از طرفی منبع تغذیه‌های جوشکاری صنعتی انعطاف‌پذیری لازم برای تحقیقات کنترل RSW را ندارند؛ لذا ساخت یک Set-up برای انجام آزمایش‌های تحقیق حاضر ضروری است. به‌منظور کاهش هزینه‌ها، تصمیم بر آن شد که به‌جای استفاده از رکتیفایر یا اینورتر برای یکسوسازی جریان، مستقیماً از یک باتری با جریان مستقیم استفاده گردد. هنگامی باید به این امر توجه شود که جریان جوشکاری از طریق الکترود به قطعه‌کارها جریان می‌یابد، منطقی است که اندازهٔ نوک الکترود، اندازهٔ جوش مقاومتی نقطه‌ای را کنترل نماید. قطر الکترود که در اینجا مورد بحث می‌باشد به قطر نوک الکترود در نقطهٔ تماس با ورق برمی‌گردد، نه به قطر اصلی کل نوک الکترود. رابطه‌ای که عموماً استفاده می‌شود به‌صورت زیر است [12]:

$$d_e = 5\sqrt{T} \qquad (۱۲)$$

که در آن T ضخامت ورق و d_e قطر نوک الکترود می‌باشد. بااستفاده از رابطهٔ (۱۲) مقدار ۳/۱٦ mm برای قطر نوک الکترود به‌دست می‌آید. الکترود فوقانی روی سر رزوه‌شدهٔ پیستون و الکترود تحتانی روی کفی نصب می‌شوند. پس‌از نصب تجهیزات مکانیکی، Set-up تراز شده و از هم‌راستایی الکترودها اطمینان حاصل شده‌است. تصویر Set-up نهایی در شکل (٦) قابل‌مشاهده است. برای کنترل زمان رفت‌وبرگشت پیستون از شیر برقی- پنوماتیک استفاده شده‌است. کنترل فشار (نیرو) توسط رگولاتوری که برروی خروجی کمپرسور نصب شده‌است، انجام می‌گیرد. مدار برقی مربوط به سیلندر پنوماتیک دارای بخش‌های منبع تغذیه، PLC، شیر برقی- پنوماتیک و شستی می‌باشد.



شکل ٦ Set-up ساخته شده و اجزای آن

بااستفاده از باتری خودرو موفق شدیم جوش با استحکام مناسب را ایجاد نماییم. برای رفع مشکل تخلیهٔ باتری و همچنین کاهش جریان آن و جلوگیری از عدم توانایی کنترل جریان، باتری به یک شارژر متصل می‌گردد که یک جریان DC پشت باتری ایجاد می‌کند و دارای ۳ سطح جریان گوناگون می‌باشد که با زدن کلیدهای آن می‌توان از جریان خود باتری، جریان متوسط و یا جریان بیشینه استفاده نمود. وظیفهٔ تبدیل جریان برق شهر به جریان DC برای تغذیهٔ باتری نیز به‌عهدهٔ همین دستگاه می‌باشد. فرکانس دستگاه ۵۰Hz است و ولتاژ خروجی آن ۱۲ V می‌باشد.

آلیاژ Hastelloy X که برای استفاده در آزمایش‌ها درنظرگرفته شده‌است یک آلیاژ نیکل- کروم است که دارای ترکیبی استثنائی از مقاومت در برابر اکسیداسیون، قابلیت ساخت و مقاومت در دمای بالا می‌باشد. این آلیاژ کاربرد وسیعی در موتورهای توربین گازی برای اجزای قسمت محفظهٔ احتراق دارد. برای مثال می‌توان به کانال‌های انتقال، قوطی محفظهٔ احتراق، میلهٔ اسپری و نگه‌دارنده‌های شعله اشاره کرد. همچنین در انژکتور سوخت در موتور توربین و لولهٔ خارج‌کنندهٔ دود شعله کاربرد دارد. این آلیاژ برای استفاده در کوره‌های صنعتی به‌دلیل مقاومت اکسیداسیون خارق‌العادهٔ آن در فشارهای کم و معمولی پیشنهاد می‌گردد. در جدول (۱) آنالیز شیمیایی Hastelloy X مشاهده می‌شود.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی Hastelloy X (درصد وزنی)

Ni	Cr	Fe	Mo	Co	W	C	Mn	Si	B
٤٧	٢٢	١٨	٩	١/٥	٠/٦	٠/١	١*	١*	٠/٠٠٨*

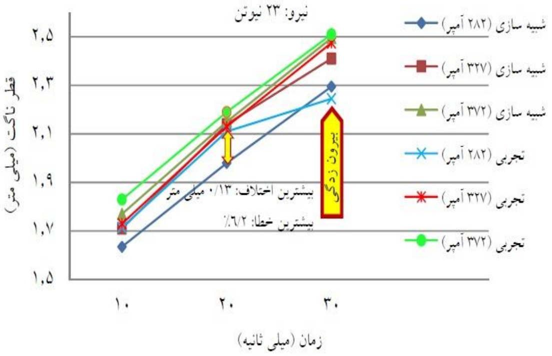
*حداکثر

به‌منظور اندازه‌گیری پارامترها از دو مولتی‌متر به‌صورت هم‌زمان برای اندازه‌گیری مقاومت تماسی و شدت جریان استفاده شده‌است. این دستگاه همچنین قادر است اختلاف پتانسیل بین دو نقطه را اندازه‌گیری نماید. یک خروجی دیگر (غیر از خروجی شیر پنوماتیک) در برنامه‌نویسی PLC تعریف می‌گردد که این خروجی توسط رله‌ای که در مسیر آن قرار می‌گیرد به یک استارتر خودرو فرمان می‌دهد و استارتر در زمان مشخص‌شده در برنامهٔ PLC جریان الکتریکی را قطع و وصل می‌کند. زمانی پس‌از قطع جریان عمل جدا شدن الکترود از ورق بالایی انجام می‌پذیرد که این زمان قابل تنظیم است.

برای بررسی تأثیر لایهٔ فیلم و اکسید برروی قطعه‌ها، نمونه‌ها به سه گروه تقسیم می‌شوند؛ نمونه‌های تمیز (بدون فیلم)، نمونه‌هایی با فیلم نازک و نمونه‌هایی با فیلم ضخیم که ایجاد لایهٔ فیلم توسط قرار دادن نمونه‌ها در آب جوش به‌مدت ۵ دقیقه برای فیلم نازک و ٤٠ دقیقه برای فیلم ضخیم صورت پذیرفته‌است. برای تحلیل نتایج قطر و ارتفاع دکمهٔ جوش اندازه‌گیری می‌شود. فرایند آزمایش کشش- برش برای دست‌یابی به حداکثر باری که قطعه‌ها می‌توانند تحمل نمایند نیز بااستفاده از دستگاه کشش Universal شرکت Gotech انجام می‌پذیرد. نمودار تنش- کرنش برای هر یک از نمونه‌ها ترسیم می‌شود و همچنین مقادیر تنش تسلیم، بیشترین بار، مقاومت کششی و افزایش طول در هر یک از حالت‌ها مشخص می‌گردد.

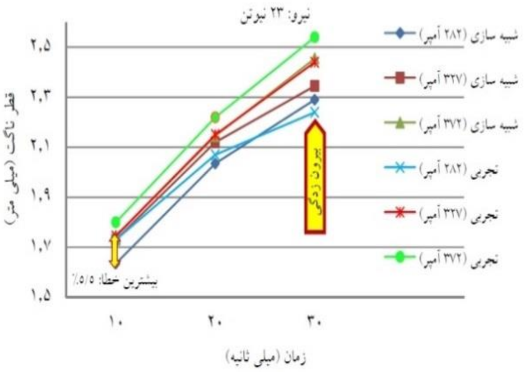
نتایج و بحث

شکل (۷) نتایج حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش‌ها را با درنظر گرفتن لایهٔ فیلم به‌ضخامت 1 µm برای قطر دکمهٔ جوش در نیروی ۲۳ N مقایسه می‌کند. بررسی نمودارهای مشابه در سایر نیروها نشان می‌دهد که هرچند نتایج نزدیک هستند، اما مقدار اختلاف در قطر دکمهٔ جوش از حالت‌های مشابه برای نمونه‌های بدون فیلم بیشتر است. تأثیر کلی پارامترها همانند قبل است، یعنی افزایش زمان و جریان باعث افزایش قطر دکمهٔ جوش می‌شود و افزایش نیرو قطر دکمهٔ جوش را کاهش می‌دهد. در برخی موارد پدیدهٔ بیرون‌زدگی باعث تغییر روند نمودارهای مرتبط با آزمایش‌ها می‌شود. مقایسهٔ نتایج شبیه‌سازی و تجربی برای قطر دکمهٔ جوش با درنظر گرفتن لایهٔ نازک فیلم و در جریان‌های گوناگون مشخص می‌کند که نتایج بسیار نزدیک است و بیرون‌زدگی در جریان ۲۸۲ A و زمان ۳۰ ms برای نیروهای ۲۳ N و ۳۱ N رخ می‌دهد. همچنین تأثیر تغییرات جریان و نیرو برای زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ ms با وجود لایهٔ فیلم 1 µm بررسی می‌گردد. در کل بیشترین اختلاف در قطر دکمهٔ جوش پس از مقایسهٔ نتایج شبیه‌سازی و تجربی مربوط به نیروی ۲۳ N، جریان ۲۸۲ A و زمان ۲۰ ms می‌باشد که مقدار آن ۰/۱۳ mm است. بیشترین درصد خطا نیز مربوط به همین مورد و به مقدار ٦/٦٪ است که نشان می‌دهد مدل شبیه‌سازی جدید به‌خوبی قادر به پیش‌بینی قطر دکمهٔ جوش با وجود لایهٔ فیلم برروی نمونه‌ها می‌باشد. میانگین درصد خطا برای حالت فیلم نازک ۲/۷٪ است که نسبت به حالت بدون فیلم ۱/٦٪ افزایش را نشان می‌دهد. این افزایش خطا می‌تواند به‌دلیل تفاوت ترکیبات فیلم در شبیه‌سازی و آزمایش و همچنین عملکرد غیرقابل پیش‌بینی فیلم و عدم یکنواختی فیلم توزیع‌شده برروی نمونه‌ها باشد.



شکل ۷ قطر دکمهٔ جوش حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش‌ها در نیروی ۲۳ نیوتن با لایهٔ فیلم به ضخامت 1 µm

شکل (۸) مربوط است به نتایج قطر دکمهٔ جوش که از شبیه‌سازی و آزمایش‌ها در نیروی ۲۳ N و با وجود لایهٔ فیلم با ضخامت 10 µm به‌دست آمده‌است. باتوجه به نمودارهای مشابه در سایر نیروها می‌توان گفت تأثیر پارامترها و روند نمودارها همانند موارد قبلی است. نمودارهای مشابه برای جریان‌ها و زمان‌های گوناگون بیانگر وقوع بیرون‌زدگی در جریان ۲۸۲ A و زمان ۳۰ ms در نیروهای ۲۳ N و ۳۱ N می‌باشد.

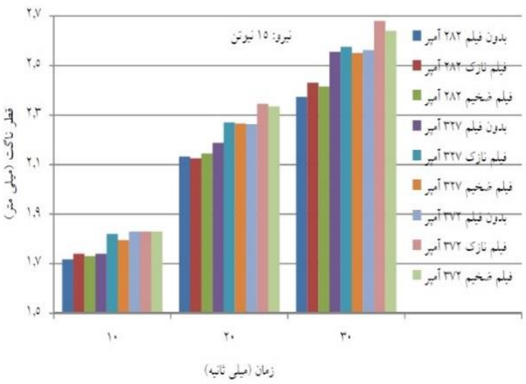


شکل ۸ قطر دکمهٔ جوش حاصل از شبیه‌سازی و آزمایش‌ها در نیروی ۲۳ نیوتن با لایهٔ فیلم به‌ضخامت 10 µm

درمجموع تفاوت بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی در حالت وجود فیلم ضخیم نیز زیاد نیست و سازگاری خوبی قابل‌مشاهده است. به‌لحاظ آماری بیشترین تفاوت قطر دکمهٔ جوش بین شبیه‌سازی و آزمایش‌ها

۰/۱۲mm است که مربوط به به‌کارگیری نیـروی ۱۵ N، جریان ۳۷۲ A و زمان ۲۰ ms است. اما بیشترین درصد خطا به‌مقـدار ۵/۸٪ مربـوط بـه نیـروی ۲۳ N، جریـان ۲۸۲ A و زمان ۱۰ ms می‌باشد. میانگین درصد خطـای کل حالت‌ها برای لایهٔ فیلم ضخیم ۲/۵٪ مـی‌باشـد کـه نسبت به لایهٔ فیلم نازک کمی کمتر است.

تغییرات قطر دکمهٔ جـوش حاصـل از آزمـایش در نیروی ثابت ۱۵ N برای زمان‌ها و جریان‌های گونـاگون برای هر سه حالت نمونه‌های بدون فیلم، با فیلم نـازک و با فیلم ضخیم در شکل (۹) قابل‌مشاهده است.



شکل ۹ تغییرات قطر دکمهٔ جوش حاصل از آزمایش در نیروی ۱۵ نیوتن در زمان‌ها و جریان‌های گوناگون برای نمونه‌های بدون فیلم، با فیلم نازک و با فیلم ضخیم

نمودارهای مشابهی برای نیروهـای ۲۳ N و ۳۱ N، جریان‌های گوناگون و زمان‌هـای مختلـف نیـز ترسـیم می‌گردد. در نیـروی ۱۵ N بـرای یـک جریـان و زمـان مشخص، بیشترین قطر دکمهٔ جوش با وجود لایهٔ نازک فیلم حاصل می‌شـود. همچنـین در حالـت بـدون فـیلم کمترین قطر دکمهٔ جوش را خواهیم داشت. در نیـروی ۲۳ N لزوماً اتفاق نیروی ۱۵ N تکـرار نمـی‌شـود و در پنج مورد قطـر حاصـل از لایـهٔ ضـخیم بیشـتر اسـت، درحالی‌که در سه مورد نیز قطر حاصـل از لایـهٔ نـازک بیشتر می‌باشد. سـرانجام بـا دقـت در نمـودار F=31 N متوجه می‌شویم که باز هم در اغلب موارد (۷ مـورد از ۹ مورد) قطر حاصل از لایهٔ فیلم نازک دارای بیشـترین مقدار می‌باشد.

دلیل رفتار متفاوت لایه‌های فیلم را می‌توان به این صورت تفسیر نمود که در نیروی کم لایـهٔ فـیلم نـازک باعث ایجاد گرمای بیشتری می‌شـود. درحـالی‌کـه لایـهٔ ضخیم فیلم به‌دلیل خاصیت عایق‌بودن، در عبور جریان الکتریکی ممانعت به‌وجود می‌آورد؛ اما هنگامی که نیرو افزایش می‌یابد، فشـار حاصـل از افـزایش نیـرو باعـث بیرون‌راندن لایهٔ فیلم ضخیم از منطقهٔ تماسی می‌شود و صرفاً لایهٔ نازکی از فیلم در ناحیهٔ ایجاد حـرارت بـاقی خواهد ماند. درنتیجه لایهٔ فیلم ضخیم دکمه‌های جوش بزرگ‌تری ایجاد می‌کند. سرانجام بـا رسـیدن نیـرو بـه مقدار حداکثر خـود نتـایج هـر سـه حالـت بسـیار بـه یکدیگر نزدیک می‌شوند؛ ولـی درمجمـوع لایـهٔ نـازک فیلم قطرهای دکمهٔ جوش بزرگ‌تری را ایجاد می‌کند.

تغییرات قطر دکمهٔ جـوش بـرای هـر سـه حالـت مورد بحث در جریـان‌هـای ثابـت بررسـی مـی‌شـود و مشاهده می‌گردد که در جریـان ۲۸۲ A در اکثـر مـوارد لایهٔ نازک فیلم بیشترین قطر دکمهٔ جـوش را بـه‌دسـت می‌دهد. در جریان ۳۲۷ A نیز به‌غیر از دو مورد که قطر دکمهٔ جوش بیشینه در لایهٔ ضخیم فیلم به‌وجود می‌آید، در هفت مورد دیگر بیشترین قطر با وجود لایـهٔ نـازک فیلم به‌دست خواهد آمد؛ اما چنان‌چـه حـداکثر جریـان مورداستفاده قرار گیرد، در نصف موارد بیشترین قطر با وجود لایهٔ نازک به‌وجـود مـی‌آیـد و در نصـف دیگـر موارد با وجود لایهٔ ضخیم. احتمالاً جریـان‌هـای کـم و متوسط، قدرت و چگـالی جریـان لازم بـرای شکسـتن لایه‌های فیلم ضخیم را ندارد؛ ولی این اتفاق در جریان حداکثر رخ می‌دهد.

نمودار تغییرات قطر دکمهٔ جوش در زمان‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ ms نیز مورد تحلیل قرار مـی‌گیـرد. در زمـان ۱۰ ms در نصف موارد فیلم نـازک و در نصـف دیگـر موارد فیلم ضخیم قطر دکمهٔ جوش بیشـتری بـه‌دسـت می‌دهد. در زمان ۲۰ ms در جریان‌های کـم و متوسـط،

فیلم نازک قطر دکمهٔ جوش بیشتری تولید می‌کند، ولی چنان‌چه جریان حداکثر باشد، فیلم‌های ضخیم قطر بیشتری به‌وجود می‌آورند. در زمان طولانی‌تر (۳۰ ms) در جریان کم رفتار نمونه‌ها متفاوت است؛ ولی در جریان‌های متوسط و بالا، حداکثر قطر برای لایهٔ نازک فیلم و حداقل قطر دکمهٔ جوش در نمونه‌های بدون فیلم ایجاد می‌شود.

نمودارهای تغییرات بیشترین بار تحمل‌شده در آزمایش کشش برای نمونه‌های بدون فیلم و با فیلم برای نیروهای ثابت، جریان‌های ثابت و زمان‌های مشخص تحلیل می‌گردد. در اکثر موارد برای نمونه‌های دارای فیلم، مقدار حداکثر بار بیشتر است. البته در برخی موارد استثناءهایی در زمان‌های طولانی وجود دارد. درمجموع مشخص می‌شود که اگرچه وجود فیلم در زمان‌های کم باعث افزایش استحکام جوش می‌شود؛ اما در زمان‌های طولانی چندان مطلوب نیست. تأثیر ضخامت فیلم بر ارتفاع دکمهٔ جوش با تغییر سایر پارامترها نیز بررسی می‌گردد. به‌نظر می‌رسد تأثیر فیلم بر ارتفاع دکمهٔ جوش بستگی به شرایط گوناگون دارد و رفتار خاصی قابل‌مشاهده و یا پیش‌بینی نیست. در برخی موارد افزایش‌های ناگهانی در ارتفاع دکمهٔ جوش دیده می‌شود که عموماً مربوط به حالت لایهٔ فیلم 10 μm است و به‌دلیل رخداد بیرون‌زدگی می‌باشد.

میانگین قطر دکمهٔ جوش به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها در تمامی حالت‌ها (۳ سطح برای هر یک از پارامترهای نیرو، جریان و زمان) برای هر یک از سه حالت بدون فیلم، فیلم نازک و فیلم ضخیم در نمودار شکل (۵) ترسیم شده‌است. بیشترین قطر دکمهٔ جوش در هنگام استفاده از نمونه‌های دارای لایهٔ فیلم نازک به‌دست آمده‌است. قطر دکمهٔ جوش در حالت استفاده از نمونه‌های بدون فیلم کمینه است. دلیل این پدیده قطعاً به‌علت افزایش حرارت تولیدشدهٔ ناشی‌از حضور لایهٔ فیلم است که باعث ایجاد مقاومت فیلم می‌شود و درنتیجه مقاومت تماسی و درپی آن مقاومت الکتریکی کل را افزایش می‌دهد. با افزایش مقاومت، حرارت ایجادشده توسط قانون ژول افزایش می‌یابد و منطقهٔ مذاب و درنتیجه قطر دکمهٔ جوش ایجادشده بزرگ‌تر می‌شود؛ اما با افزایش ضخامت لایه به‌دلیل مقاومت بالای فیلم عبور جریان از منطقهٔ تماسی سخت‌تر می‌شود و درنتیجه چگالی جریان عبوری از ناحیهٔ تماسی کاهش می‌یابد و حرارت ایجادشده نسبت‌به حالت لایهٔ نازک کاهش می‌یابد. درواقع باید گفت برای ضخامت لایهٔ فیلم مقدار بهینه‌ای وجود دارد که در آن ضخامت حداکثر حرارت تولید خواهد شد.

تحلیل نتایج نشان می‌دهد که بیشترین بار تحمل‌شده در فرایند کشش در نمونه‌های دارای فیلم، بیشتر از نمونه‌های بدون فیلم است. دلیل این امر افزایش حرارت تولیدشده به‌سبب افزایش مقاومت الکتریکی در حضور فیلم می‌باشد که باعث امتزاج کامل فلز مذاب در ناحیهٔ تماسی بین دو ورق می‌شود. بیشترین ارتفاع دکمهٔ جوش در نمونه‌های دارای فیلم ضخیم مشاهده شده‌است. این پدیده می‌تواند به‌دلیل وقوع بیرون‌زدگی به‌جهت وجود مقاومت بسیار زیاد در هنگام عبور جریان به‌وجود آید. در حالتی که لایهٔ فیلم دارای ضخامت کمی است، حرارت ایجادشده به‌سبب مقاومت فیلم باعث ذوب سریع‌تر فلز می‌شود و اعمال نیرو ارتفاع دکمهٔ جوش را کاهش می‌دهد.

نتیجه‌گیری

پس از ارائهٔ یک مدل جدید برای محاسبهٔ مقاومت الکتریکی تماسی و انجام شبیه‌سازی‌ها، یک Set-up جدید ساخته شد و توسط آن جوش‌های بدون نقص برروی سوپرآلیاژ Hastelloy X ایجاد گردید. نتایج مشخص کرد که افزایش زمان و جریان باعث افزایش قطر دکمهٔ جوش می‌شود و افزایش نیرو قطر دکمهٔ جوش را کاهش می‌دهد. میانگین درصد خطا برای حالت‌های بدون فیلم، فیلم نازک و فیلم ضخیم

به‌ترتیب ۱/۱٪، ۲/۷٪ و ۲/۵٪ می‌باشد که نشان‌دهندهٔ سازگاری مناسب بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایش‌ها است. اختلاف‌ها می‌تواند به‌دلیل تفاوت ترکیب فیلم در شبیه‌سازی و آزمایش و همچنین عملکرد غیرقابل پیش‌بینی فیلم و عدم یکنواختی فیلم توزیع‌شده باشد.

بیشترین قطر دکمهٔ جوش در هنگام استفاده از نمونه‌های دارای لایهٔ فیلم نازک به‌دست می‌آید. قطر دکمهٔ جوش در حالت استفاده از نمونه‌های بدون فیلم کمینه است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که برای ضخامت فیلم مقدار بهینه‌ای وجود دارد که در آن حداکثر حرارت تولید خواهد شد. در زمان‌های کم وجود فیلم باعث افزایش استحکام جوش می‌شود؛ اما وجود فیلم در زمان‌های طولانی چندان مطلوب نیست. بیشترین ارتفاع دکمهٔ جوش در نمونه‌های دارای لایهٔ فیلم ضخیم مشاهده شده‌است.

مراجع

1. Kraus, A.D. and Bar-Cohen, A., "*A Thermal Analysis and Control of Electronic Equipment*", McGraw-Hill, New York, (1983).
2. Hamedi, M. and Atashparva, M., "A Rview of Electrical Contact Resistance Modeling in Resistance Spot Welding", *Welding in the World*, Vol. 61(2), pp. 269-290, (2017).
3. Holm, R., "*Electric Contacts, Theory and Application*", Springer-Verlag, Berlin, 4th Edition, (1967).
4. Wagar, H.N., In: "Integrated Device and Connection Technology", Baker, D., et al. (Eds.), *Physical Design of Electronic System*, Vol. 3, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, pp. 439-499, (1971).
5. Greenwood, I.A., "Temperatures in Spot Welding", *British Welding Journal*, Vol. 8(6), pp. 316-322, (1961).
6. Na, S.J. and Park, S.W., "A Theoretical Study on Electrical and Thermal Response in Resistance Spot Welding", *Welding Journal*, pp. 233-241, (1996).
7. Crinon, E. and Evans, J.T., "The Effect of Surface Roughness, Oxide Film Thickness and Interfacial Sliding on the Electrical Contact Resistance of Aluminium", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 242, pp. 121-128, (1998).
8. Wei, P.S. and Wu, T.H., "Electrical Contact Resistance Effect on Resistance Spot Welding", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp. 3316-3324, (2012).
9. Li, M.V., Dong, P. and Kimchi, M., "Modeling of Contact Resistance during Resistance Spot Welding", *Proceedings of the 7th International Conference on Computer Technology in Welding*, pp. 423-434, San Francisco, CA, NIST, (1997).
10. Wan, X., Wang, Y., Zhao, D., Huang, Y. and Yin, Z., "Weld Quality Monitoring Research in Small Scale Resistance Spot Welding by Dynamic Resistance and Neural Network", *Measurement*, Vol. 99, pp. 120-127, (2017).
11. Chang, B.H. and Zhou, Y., "Numerical Study on the Effect of Electrode Force in Small-scale Resistance Spot Welding", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 139, pp. 635-641, (2003).
12. Williams, N.T. and Parker, J.D., "Review of Resistance Spot Welding of Steel sheets. Part 1: Modelling and Control of Weld Nugget Formation", *International Materials Reviews*, Vol. 49(2), pp. 45-75, (2004).